

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



Trabajo Fin de Grado

Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones

**ESTUDIO DE EMISIONES RADIOELÉCTRICAS EN LOS
SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES**

Alberto Brihuega García

Septiembre 2015

TRABAJO FIN DE GRADO

Título: ESTUDIO DE EMISIONES RADIOELÉCTRICAS
EN LOS SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES

Autor: ALBERTO BRIHUEGA GARCÍA

Tutor: LUIS MENDO TOMÁS

Departamento: SEÑALES, SISTEMAS Y RADIOCOMUNICACIONES

TRIBUNAL

Presidente: D. JOSÉ MANUEL RIERA SALÍS

Vocal: D. MANUEL SIERRA CASTAÑER

Secretario: D. LUIS MENDO TOMÁS

Suplente: D^a. BELÉN GALOCHA IRAGÜEN

CALIFICACIÓN:

Madrid, a de de

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



Trabajo Fin de Grado

Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones

**ESTUDIO DE EMISIONES RADIOELÉCTRICAS EN LOS
SISTEMAS DE COMUNICACIONES MÓVILES**

Alberto Brihuega García

Septiembre 2015

Resumen

El nivel de las emisiones radioeléctricas de los sistemas de comunicaciones está sometido a estrictos controles para asegurar que no puedan suponer un riesgo para la salud de la población. En España, es el estado quien tiene la potestad sobre la gestión, planificación, administración y control del dominio público radioeléctrico. Los valores máximos de exposición radioeléctrica fijados en España coinciden con los utilizados en la mayor parte de los países miembros de la Unión Europea y son considerados internacionalmente seguros. No obstante, un municipio de España está considerando fijar unos niveles máximos de exposición que son entre 4.000–10.000 veces inferiores a los que están actualmente vigentes en todo el territorio español. Dicha limitación tan radical implicaría reducir mucho la potencia transmitida por las estaciones base, lo cual afectaría gravemente a la operatividad del sistema de comunicaciones móviles de dicho municipio.

Este trabajo ha tenido como objetivo la realización de un estudio para comprobar cuantitativamente, en qué medida afecta esta reducción de potencia a los servicios de: voz, datos, banda ancha móvil y servicio de emergencias 112 que se ofrecen actualmente en dicho municipio. Para ello, se ha realizado un estudio del enlace descendente para cada uno de los servicios y se han comparado las zonas de cobertura que hay en la actualidad, con las resultantes tras la aplicación de la reducción de potencia derivada de la nueva Ordenanza Municipal.

Adicionalmente, se ha realizado un estudio donde se muestran las zonas donde se superan los valores de exposición radioeléctrica fijados por la normativa vigente (Real Decreto 1066/2001) y por la nueva Ordenanza.

Finalmente, se ha llevado a cabo un estudio aproximado del tráfico cursado por las estaciones base, en el cual se pretende reflejar el sobredimensionamiento que experimentaría la red en términos de capacidad al aplicar la reducción de potencia.

Abstract

The maximum quantity of transmission of power via electromagnetic waves is subjected to strict controls in order to make sure they cannot mean a risk to the population. In Spain, the State has the legal authority to manage, plan and control the electromagnetic spectrum. The limits of electromagnetic exposure established in Spain match most of the ones used by the countries in the European Union; these values are considered internationally safe . However, a new proposal of a town in Spain, has fixed the limit of electromagnetics exposure at a value which is between 4.000-10.000 times lower than the ones which are current in Spain nowadays. Such limitation would imply that the transmission power of base stations should be reduced up to 34 dB approximately, which would seriously affect the mobile system operability.

The objective of this work is to carry out a research to quantitatively prove, how the reduction of the transmitted power would affect the following mobile services: voice, data, broadband data and 112 emergency service, which are offered in the town at the moment. To that end, the downlink has been studied for every single service as well as the network coverage. The network coverage of the cellular system corresponding to the new limit has also been assessed, and has been compared to the one which applies now.

Furthermore, a study of the areas in which the limits of electromagnetic exposure are surpassed has been done, for both the existing regulation and the new Ordinance.

Lastly, a study of the amount of traffic carried by the base stations has been performed, in order to show the oversizing that the network would experiment due to the reduction of transmitted of power.

Índice

Resumen	I
Abstract	II
Lista de Acrónimos	VI
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Marco legal bajo el que se desarrolla el proyecto	1
1.3. Objetivos	4
2. Software empleado	5
3. Mapas empleados	6
4. Metodología del estudio	6
4.1. Cálculo de umbrales	7
4.2. Correcciones de umbrales	13
4.2.1. Correcciones para GSM, UMTS y LTE	13
4.2.2. Correcciones para los servicios de voz/datos/banda ancha con reducción de potencias	14
4.2.3. Correcciones estudio de emisiones (suma de potencias)	15
4.2.4. Correcciones 112	15
4.3. Importación de transmisores en SIRENET	16
4.4. Creación de estudios multicobertura	17
4.5. Ajuste de coordenadas de transmisores	19
4.6. Simulación	19
4.7. Estudio de emisiones	20
4.8. Mejor servidor	20
5. Mapas de resultados de servicios	20
5.1. Servicio de voz	21
5.1.1. Voz en exteriores	21
5.1.2. Voz en interiores	24
5.2. Servicio de datos	25
5.2.1. Datos en exteriores	25
5.2.2. Datos en interiores	27
5.3. Servicio de banda ancha	29

5.3.1.	Banda ancha en exteriores	29
5.3.2.	Banda ancha en interiores	31
5.4.	Servicio 112	33
5.4.1.	Servicio 112 en exteriores	33
5.4.2.	Servicio 112 en interiores	35
5.5.	Estudio de emisiones	36
6.	Estudio aproximado del tráfico cursado por las estaciones base	39
6.1.	Fórmula de Erlang B	40
6.1.1.	Tráfico ofrecido	40
6.1.2.	Tráfico cursado	40
6.1.3.	Capacidad en sistemas CDMA	41
6.1.4.	Resultados de la simulación	43
7.	Conclusiones	46
8.	Referencias	48

Índice de figuras

1.	Voz en exteriores actual	22
2.	Voz en exteriores con potencia reducida	23
3.	Voz en interiores actual	24
4.	Voz en interiores con potencia reducida	25
5.	Datos en exteriores actual	26
6.	Datos en exteriores con potencia reducida	27
7.	Datos en interiores actual	28
8.	Datos en interiores con potencia reducida	29
9.	Banda ancha en exteriores actual	30
10.	Banda ancha en exteriores con potencia reducida	31
11.	Banda ancha en interiores actual	32
12.	Banda ancha en interiores con potencia reducida	33
13.	112 en exteriores actual	34
14.	112 en exteriores con potencia reducida	34
15.	112 en interiores actual	35
16.	112 en interiores con potencia reducida	36
17.	Estudio de emisiones	37
18.	Estudio de emisiones	38
19.	Mejor servidor	44

Lista de Acrónimos

AMC	<i>Adaptative Modulation and Coding</i>
BW	<i>BandWidth</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CPICH	<i>Common Pilot Channel</i>
E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
LGT	<i>Ley General de Telecomunicaciones</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>
MISO	<i>Multiple-Input and Simple-Output</i>
OVSF	<i>Orthogonal Variable Spreading Factor</i>
PIRE	<i>Potencia Isótropa Radiada Equivalente</i>
RS	<i>Reference Signal</i>
SINR	<i>Signal to Noise-plus-Interference Ratio</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TFG	<i>Trabajo de Fin de Grado</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>

1. Introducción

1.1. Motivación

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) surge como un encargo de la empresa Ametic, en representación de los cuatro operadores móviles de España, para realizar un estudio de las emisiones radioeléctricas del sistema de comunicaciones móviles que da servicio en un cierto municipio de España, y que por razones de confidencialidad no se especificará de cuál se trata. La realización de este estudio viene motivada por la modificación de la “Ordenanza municipal reguladora de instalaciones radioeléctricas pertenecientes a las redes de telecomunicaciones” de dicho municipio, que fija unos niveles de exposición radioeléctrica contrarios a la normativa estatal vigente, el límite que se establece es entre 4.000 y 10.000 veces inferior a los de dicha normativa estatal, por lo que afectaría en gran medida a la operatividad del sistema, reduciéndose drásticamente el área de cobertura donde se ofrecen los servicios de telefonía móvil. Se utilizarán los datos reales (parámetros de configuración radio y posición de emplazamientos) con los que opera dicho sistema.

1.2. Marco legal bajo el que se desarrolla el proyecto

El nivel de emisiones radioeléctricas de un sistema de comunicaciones móviles, está sometido a estrictas regulaciones para garantizar que no pueda suponer ningún riesgo para la salud de las personas expuestas a dichas emisiones.

En España, la Ley 9/2014 de 9 de mayo, General de Telecomunicaciones (LGT), publicada en el BOE de 10 de Mayo de 2014, atribuye al Estado en su artículo 60 la titularidad, gestión, planificación, administración y control del dominio público radioeléctrico.

Entre las facultades que la LGT en su artículo 44 atribuye al Gobierno para la gestión del dominio público radioeléctrico se encuentra el desarrollo reglamentario de estas condiciones de gestión. La cláusula 1.a obliga al Gobierno a regular: “El procedimiento de determinación, control e inspección de los niveles de emisión radioeléctrica tolerable y que no supongan un peligro para la salud pública, en concordancia con las recomendaciones de la Comisión Europea. Tales límites deberán ser respetados, en todo caso, por el resto de Administraciones públicas, tanto autonómicas como locales ”.

En la actualidad, esta obligación se concreta en dos normativas que se encuentran plenamente

vigentes en este momento:

- El Real Decreto 1066/2001 de 28 de septiembre aprobó el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.
- La orden Ministerial CTE/23/2002, de 11 de enero, por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones.

El Real Decreto 1066/2001 asume los criterios de protección sanitaria frente a los campos electromagnéticos establecidos en la recomendación del Consejo de Ministros de Sanidad de la Unión Europea, de 12 de julio de 1999.

Del mismo modo, prevé mecanismos de seguimiento de los niveles de exposición mediante la presentación de certificaciones e informes por los operadores de telecomunicaciones, la realización de planes de inspección y la elaboración de un informe anual por parte del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

En cuanto a los niveles de exposición, los límites se establecen en términos de restricciones básicas y niveles de referencia, de acuerdo con las definiciones dadas en el Artículo 1 del Anexo II del Real Decreto:

- Restricciones básicas: Las restricciones a la exposición de los campos electromagnéticos basadas directamente en los efectos conocidos sobre la salud y en consideraciones biológicas. Se utilizan en términos SAR (specific energy absorption rate) y densidad de potencia.
- Niveles de referencia: Se ofrecen a efectos prácticos de evaluación de la exposición, para determinar la probabilidad de que se sobrepasen las restricciones básicas. El cumplimiento del nivel de referencia garantizará el respeto de la restricción básica pertinente. Que el valor medido sobrepase el nivel de referencia no quiere decir necesariamente que se vaya a sobrepasar la restricción básica.

Para el caso de las estaciones base de telefonía móvil se aplican los niveles de referencia que se especifican en el cuadro 2, del artículo 3 del anexo II del Real Decreto. En las bandas de comunicaciones móviles los niveles especificados son:

- 41.2 V/m para la banda de 900 MHz

- 58.2 V/m para la banda de 1800 MHz
- 61.4 V/m para la banda de 2000 MHz

A continuación se muestra una tabla con los niveles máximos de exposición para el público, para cada una de las bandas en las que se ofrecen servicios de comunicaciones móviles, en cada uno de los países miembros de la Unión Europea.

Tabla 1 Niveles máximos de exposición para el público en general, en intensidad de campo (V/m)

PAIS	900 MHz	1800 MHz	2000 MHz
Alemania	41.2	58.2	61.4
Austria	41.2	58.2	61.4
Bélgica	20.6	29.1	30.7
Chipre	20.6	29.1	30.7
Dinamarca	41.2	58.2	61.4
España	41.2	58.2	61.4
Eslovaquia	41.2	58.2	61.4
Estonia	41.2	58.2	61.4
Finlandia	41.2	58.2	61.4
Francia	41.2	58.2	61.4
Grecia	41.2	58.2	61.4
Holanda	41.2	58.2	61.4
Hungría	41.2	58.2	61.4
Irlanda	41.2	58.2	61.4
Italia	19.4	19.4	19.4
Letonia	41.2	58.2	61.4
Lituania	41.2	58.2	61.4
Luxemburgo	3	3	3
Malta	41.2	58.2	61.4
Polonia	6.14	6.14	6.14
Portugal	41.2	58.2	61.4
Reino Unido	41.2	58.2	61.4
República Checa	41.2	58.2	61.4
Suecia	41.2	58.2	61.4

El 1 de abril de 2015, una asociación de empresas del sector de las telecomunicaciones, presentó ante la Secretaría del Consejo para la Unidad de Mercado, una reclamación contra la modificación de la “Ordenanza municipal reguladora de instalaciones radioeléctricas pertenecientes a las redes de telecomunicaciones” del municipio en cuestión, por ser contraria dicha modificación a los límites de exposición fijados en el Artículo 1 del Anexo II del Real Decreto.

El artículo 9 de dicha ordenanza establece que los ciudadanos no estarán sometidos a niveles superiores a 1 mW/m^2 , ni en los lugares de trabajo ni en los lugares de residencia. Este valor equivale a un nivel de intensidad de campo de:

$$\phi = \frac{|E_0|^2}{\eta} \longrightarrow 0.001 \text{ W/m}^2 = \frac{|E_0|^2}{120\pi} \longrightarrow E_0 = \sqrt{120\pi \cdot 0.001} = 0.6139 \text{ V/m}$$

Dicho valor se encuentra muy por debajo del fijado actualmente por el Real Decreto, como puede observarse. Este valor es entre 4.000 y 10.000 veces inferior al nivel actual, dependiendo de la banda de trabajo.

Considerando que las estaciones de telefonía móvil están en media 9 metros alejadas de los edificios, calculamos la PIRE (potencia isotrópica radiada equivalente) máxima que podría emitirse desde cada transmisor para no superar el valor de 0.6139 V/m:

$$\langle S \rangle = \frac{PIRE}{4\pi d^2} = \frac{|E_0|^2}{\eta} \longrightarrow PIRE = \frac{|E_0|^2 \cdot 4\pi d^2}{\eta} = \frac{0.6139^2 \cdot 4\pi \cdot 9^2}{120\pi} = 1.01755 \text{ W}$$

que corresponde a un valor en dBm de: 30.07 dBm

Teniendo en cuenta que aproximadamente el nivel medio de PIRE de las estaciones base es de 64 dBm (la potencia máxima de transmisión de la estación base está limitada a unos 40-48 dBm, y la ganancia de las antenas varía entre 14-18 dBi en función de la banda) esto implicaría reducir la potencia transmitida en 34 dB. Como consecuencia de dicha reducción de potencia, las zonas de recepción que satisfacen los umbrales de potencia necesarios para poder ofrecer los servicios de voz, datos y banda ancha móvil quedan gravemente reducidas.

1.3. Objetivos

Se definen los siguientes objetivos para este TFG:

- Realizar una comparativa entre las zonas de cobertura donde se ofrecen actualmente los servicios de voz, datos, banda ancha y 112, y las zonas resultantes tras aplicar la

reducción de potencia derivada de la nueva normativa.

- Realizar un estudio de emisiones en el que se comparen las zonas del municipio donde se superan (en el caso de que así sea) los umbrales máximos de exposición correspondientes al Real Decreto y a la nueva Normativa.
- Realizar un estudio aproximado del tráfico cursado por las estaciones base.

Los estudios se han realizado para los cuatro operadores, sin embargo sólo se mostrarán los resultados pertenecientes a uno de ellos (salvo el estudio de emisiones y el 112 que aúnan los transmisores de los cuatro operadores) y por motivos de confidencialidad, tampoco se indicará de cuál se trata.

2. Software empleado

Los cálculos se han realizado con la herramienta de planificación SIRENET. Se trata de una herramienta de gestión del espectro radioeléctrico destinada a la planificación de las redes de radio y al análisis de compatibilidad electromagnética.

La herramienta se basa en la simulación de entornos reales apoyándose en un avanzado sistema de información geográfica, en la reproducción exacta del comportamiento de los equipos radioeléctricos y en los algoritmos más avanzados y actuales para la predicción de la propagación en distintos entornos.

Para este Trabajo Fin de Grado, se ha utilizado la versión de SIRENET 3.5.0.0, versión especialmente modificada por la empresa para permitir realizar los cálculos correspondientes al estudio de emisiones, es decir, la suma cuadrática de los campos generados por múltiples estaciones base.

3. Mapas empleados

Para poder realizar los cálculos de las pérdidas de propagación, se necesita tener información detallada del terreno que circunda a los transmisores. Para ello, se encargó a la empresa Áptica (empresa responsable del software SIRENET) una serie de mapas de dicho municipio. Estos mapas cuentan con una resolución de 2 metros, lo que proporciona una gran precisión a la hora de realizar las simulaciones y obtener así, resultados que se aproximan más a lo que ocurre en la realidad. Los mapas que se utilizaron fueron los siguientes:

- Mapa de cotas: Donde la cota presentada corresponde a la suma de la cota del terreno y la altura del edificio.
- Mapa de edificios: Donde las calles se representan con una cota de 0 metros y los edificios con su altura real.
- Mapa de calles: Donde se representan las calles con su nombre y los edificios (es el mapa de la ciudad).

4. Metodología del estudio

El objetivo del estudio es fundamentalmente de carácter cuantitativo, con el fin de proporcionar una valoración sobre el impacto que tendría en los servicios de telefonía móvil la reducción en 34 dB de la potencia transmitida, derivada de la nueva normativa. Para ello, se han simulado cada uno de los servicios para las potencias de transmisión actuales y las que quedarían tras la correspondiente reducción de potencia.

Los servicios que se van a analizar son:

- Servicio de voz
- Servicio de datos
- Servicio de banda ancha
- 112

Para los estudios sólo se considera el enlace descendente, ya que el objetivo del trabajo es ver el nivel de radiación que producen las estaciones base y comparar el área cubierta para

cada una de las dos normativas, por lo que el enlace ascendente carece de interés.

El servicio de voz es ofrecido por los operadores a través de sus emplazamientos de: GSM en las bandas de 900 y 1800 MHz; y por sus emplazamientos de UMTS en las bandas de 900 y 2100 MHz.

En cuanto a los servicios de datos, se han dividido en dos categorías: banda ancha y datos, ya que cada uno de ellos proporciona diferentes tasas binarias y por tanto, tienen diferentes requisitos de potencia umbral. Dentro de banda ancha, se hace a su vez una subdivisión distinguiendo el tipo de tecnología que la proporciona: UMTS o LTE.

Tanto el servicio de datos como el de banda ancha es ofrecido por los operadores a través de sus emplazamientos de: UMTS en las bandas de 900 y 2100 MHz, y por sus emplazamientos de LTE en las bandas de 1800 y 2600 MHz.

Por último, en el servicio de 112 se consideran los emplazamientos de GSM en las bandas de 900 y 1800 MHz; y los emplazamientos de UMTS en las bandas de 900 y 2100 MHz de los cuatro operadores conjuntamente.

4.1. Cálculo de umbrales

Para garantizar cada uno de estos servicios se han fijado unos niveles de potencia umbral, que deben entenderse como niveles de potencia media recibida por el terminal, en los que ya se tienen en cuenta los márgenes por sombra. Estos niveles se derivan de las características técnicas de cada tecnología.

Tabla 2. Potencia mínima necesaria

Situación	Exterior	Interior
Voz GSM 900 y 1800 MHz	−87 dBm	−72 dBm
Voz UMTS 900 y 2100 MHz	−99 dBm	−84 dBm
Datos UMTS 900 y 2100 MHz	−94 dBm	−79 dBm
Banda ancha UMTS 900 y 2100 MHz	−85 dBm	−70 dBm
Datos LTE 1800 MHz	−90 dBm	−75 dBm
Banda ancha LTE 1800 MHz	−81 dBm	−66 dBm

Los valores de umbral considerados en el estudio se obtienen a partir de métodos parecidos a los que utilizan los operadores de telefonía móvil para la planificación de sus redes. A continuación se explica, aunque, sin mucho detalle, ya que no es el objetivo del trabajo, cuál es la metodología que se sigue para la obtención de estos valores umbrales y a partir de ellos el área de la célula o sector.

A continuación se desarrolla el procedimiento que se sigue en la planificación radio de redes LTE. Para el resto de tecnologías se sigue un procedimiento análogo, pero con las características técnicas derivadas de los requerimientos de dicha tecnología.

En primer lugar hay que definir cuál es el servicio que va a ofrecerse, ya que como cabe esperar, el nivel de umbral y, por tanto, el área de cobertura es diferente en cada servicio. En este caso, se usa como ejemplo el servicio de banda ancha móvil LTE en la banda de 1800 MHz, con una tasa binaria de 10 Mbit/s en enlace descendente. Hay que definir una serie de parámetros del sistema para realizar los cálculos:

- Para la banda de 1800 MHz lo habitual es asignarle 10 MHz a la célula o sector, lo cual equivale a unos 50 bloques de recursos radio.
- Número de bloques asignados por conexión: 25.
- Ancho de banda asignado por conexión 4,5 MHz.
- PIRE (potencia isotropa radiada equivalente) con un valor de 57 dBm.
- Ganancia de la antena del móvil: con un valor habitual de 0 dBi.
- Pérdidas de acoplo del terminal móvil: con un valor habitual de 0 dB.
- Figura de ruido del terminal móvil: representa el ruido total en recepción, siendo un valor típico 7 dB.
- Atenuación introducida por el cuerpo: 3 dB.
- Margen de interferencia debido a otras células en DL: se suelen considerar valores en torno a 3–8 dB para móviles en el borde de la zona de cobertura.
- Probabilidad de cobertura en exteriores: Se define un valor típico del 90 % para los terminales situados en el borde de la célula.

Posteriormente, hay que comprobar que se pueden alcanzar los 10 Mbps de tasa binaria que proporciona el servicio con los 4.5 MHz de ancho de banda asignado a cada conexión. Esto implica alcanzar una eficiencia espectral de 2,22 bit/s/Hz. En LTE este análisis se realiza

a través de curvas de eficiencia espectral, que modelan aspectos del sistema que no pueden obtenerse de manera analítica debido a su complejidad, como son:

- Efecto de desvanecimiento multitrayecto, en tiempo y en frecuencia.
- Adaptación de la tasa binaria en función del estado del canal mediante técnicas de modulación y codificación adaptativas (AMC).
- Planificación de los usuarios (scheduling) en función del estado del canal radio, en tiempo y en frecuencia.
- Retransmisiones híbridas (HARQ) con combinación de retransmisiones, mediante redundancia incremental.

La máxima eficiencia espectral teórica que puede alcanzarse en un canal, viene dada por la fórmula de Shannon:

$$S_{max}(bit/s/Hz) = \log_2(1 + SNR) \quad (1)$$

En LTE, las curvas de eficiencia espectral se ajustan muy bien a la siguiente versión modificada de la fórmula de Shannon:

$$S(bits/s/Hz) = BW_{eff} \cdot \eta \cdot \log_2 \left(1 + \frac{SNR \cdot G}{SNR_{eff}} \right) \quad (2)$$

- BW_{eff} es la eficiencia de ancho de banda del sistema, donde se tiene en cuenta la pérdida de ancho de banda que se tiene como consecuencia de la utilización de prefijo cíclico, canales piloto y canales de control.
- η es un factor de ajuste que generalmente es igual a uno.
- G representa la ganancia de array en caso de utilizar sistema MIMO. En este ejemplo, se va a utilizar un sistema MISO, por lo que la ganancia de array será de 3 dB.
- SNR_{eff} es la eficiencia de SNR y cuyo valor no puede ser la unidad en los sistemas LTE, debido, entre otros factores, a la longitud limitada del código bloque. La duración del bloque transporte está limitada a 1 ms y el tamaño del actual bloque transporte depende además de la adaptación al canal y de la planificación de usuarios.

A través de las curvas de eficiencia espectral, se obtuvo que la SINR umbral para el enlace descendente en un sistema LTE MISO, con planificación de usuarios *proportional fair* y HARQ mediante combinación con redundancia incremental, y bajo las condiciones indicadas en el balance de enlace, es de 5,43 dB, siendo SNR_{eff} igual a 0,78 y BW_{eff} igual a 0,67.

Conociendo la SINR umbral, ya se puede calcular la potencia umbral requerida para ofrecer el servicio de banda ancha mediante la expresión:

$$\text{Valor de planificación en exteriores} = N + \text{SINR_Umbral} + \text{Margen_Interferencia} + \text{Margen_Exterior} \quad (3)$$

donde:

- N : Es la potencia de ruido por conexión y se calcula como: $-174 \text{ dBm/Hz} + \text{Figura de ruido del terminal} + 10 \cdot \log(BW_{\text{por_conexion}}) = -100,47 \text{ dBm}$.
- SINR_Umbral : Valor umbral de SINR obtenido a través de las curvas.
- $\text{Margen_Interferencia}$: Margen debido a la interferencia de células vecinas y es igual a 4 dB.
- Margen_Exterior : Margen por desvanecimiento por sombra para una probabilidad de cobertura en exteriores del 90 % en el borde de la célula e igual a 10.25 dB.

se obtiene así un valor de planificación para exteriores de -80,79 dBm.

Finalmente, el último paso para concluir la planificación radio, es calcular el área de cobertura de las células. Para ello se define la máxima pérdida básica que satisface el valor umbral de planificación en exteriores.

$$\text{Pérdida_Básica} = \text{PIRE_por_conexion} - \text{Valor_de_planificación} + G_R - \text{Atenuación_cuerpo} \quad (4)$$

donde:

- PIRE_por_conexion : Es la potencia isotrópica radiada equivalente por conexión y se calcula como: $\text{PIRE} + 10 \log(\% \text{Bloques_usados})$ y es igual a 54 dBm.
- $\text{Valor_de_planificación}$: Es el valor de planificación en exteriores calculado anteriormente e igual a -80,79 dBm.

- *Atenuación_cuerpo* : igual a 3 dB.
- G_R : Es la ganancia del terminal móvil y es igual a 0 dBi.

obteniéndose así una pérdida básica de 131,78 dB.

Una vez calculada la pérdida básica que podemos asumir para ofrecer nuestro servicio, se pasa a calcular el área de la célula utilizando un modelo de propagación.

Modelar la propagación de las ondas radioeléctricas en entornos complejos, como es el caso de una ciudad, es una labor muy complicada debido a la gran cantidad de elementos que intervienen en la propagación (reflexiones en edificios, personas, vegetación. . .). Por ello es necesario recurrir a modelos empíricos que permitan obtener de manera aproximada las pérdidas de propagación que experimenta la señal en función de las características del enlace radio (frecuencia, distancia, altura de las antenas, tamaño de la ciudad. . .).

Para este estudio se ha utilizado el modelo de Okumura-Hata. Se trata de uno de los modelos más extendidos y aceptados mundialmente y es utilizado por la mayoría de los operadores de telefonía móvil. Este modelo no requiere parámetros de un gran nivel de detalle, los resultados son representativos de lo que ocurre en término medio, en una zona de cobertura amplia. De esta manera se ahorra en tiempo de simulación de las coberturas y proporciona resultados más fiables que otros modelos que puedan requerir mayor nivel de detalle y por tanto, técnicas de validación más complicadas.

La fórmula fundamental de Hata, para un medio urbano y que sirve de referencia para las demás es la siguiente:

$$L_b = 69,55 + 26,16 \cdot \log f - 13,82 \cdot h_t - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \cdot \log h_t) \cdot \log d \quad (5)$$

donde:

- f : es la frecuencia en MHz, en la gama de $150 < f < 1500$ MHz
- h_t : es la altura efectiva de la antena de la estación base en metros en la gama $30 < h_t < 200$ m
- h_r : es la altura sobre el suelo de la antena del terminal móvil en metros, en la gama $1 < h_r < 10$ m
- d : distancia en km

El término $a(h_r)$ es una corrección que depende de la altura de la antena del móvil. Para una altura de 1.5 m este término es igual a 0, para otras alturas depende del tipo de ciudad.

Para ciudad mediana

$$a(h_r) = (1,1 \cdot \log(f) - 0,7) \cdot h_r - (1,56 \log(f) - 0,8) \quad [dB] \quad (6)$$

Para ciudad grande:

$$a(h_r) = 8,29 \cdot (\log(1,54 \cdot h_m))^2 - 1,1 \quad f \leq 200 \text{ MHz} \quad (7)$$

$$a(h_r) = 3,2 \cdot (\log(11,75 \cdot h_m))^2 - 4,97 \quad f \geq 400 \text{ MHz} \quad (8)$$

Debido a que el modelo está limitado a frecuencias inferiores a 1500 MHz y a la aparición de sistemas de comunicaciones móviles en las bandas de 1800 y 2000 MHz, se desarrolló una variante del modelo de Hata, conocido como Hata-COST231, válido para estas frecuencias.

$$L_b = 46,3 + 33,9 \cdot \log(f) - 13,82 \cdot h_t - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \cdot \log(h_t)) \cdot \log(d) + c_m \quad (9)$$

siendo c_m una constante de ajuste cuyos valores son:

- $c_m = 0 \text{ dB}$, para ciudades de tipo medio y áreas con una densidad de arbolado moderada
- $c_m = 3 \text{ dB}$, para grandes centros metropolitanos

Si el receptor se encuentra en una zona suburbana, caracterizada por edificaciones de baja altura y calles relativamente anchas, la atenuación es:

$$L_{b_s} = L_b - 2 \cdot [\log(f/28)]^2 - 5,4 \quad (10)$$

Por último, si el receptor se encuentra en una zona rural, abierta, sin obstrucciones en su entorno inmediato, se tiene:

$$L_{b_r} = L_b - 4,78 \cdot [\log(f)]^2 + 18,33 \cdot \log(f) - 40,94 \quad (11)$$

En este estudio se ha considerado el modelo urbano-pequeño con una altura del terminal móvil de recepción de 1.5 m.

Por lo que aplicando este modelo y siendo la pérdida básica la calculada en la planificación para exteriores, se despeja la distancia y con ella se obtiene el área de la célula o sector.

4.2. Correcciones de umbrales

A los valores umbrales mostrados en la tabla 2 hay que aplicarles las siguientes correcciones:

4.2.1. Correcciones para GSM, UMTS y LTE

En los sistemas de comunicaciones móviles el terminal de usuario realiza medidas del nivel de potencia recibida sobre un canal de referencia llamado canal piloto, con el que se determina la cobertura. En GSM, una de las portadoras que está asignada a la estación base tiene el papel de canal piloto, por lo que la potencia transmitida es la correspondiente a dicha portadora. En UMTS, sin embargo, se utiliza un canal específico (CPICH) para la transmisión del canal piloto. Dicho canal utiliza en torno al 10 % de la potencia total de la base, por lo que aplicaremos una corrección de +10 dB para los umbrales concernientes a UMTS. Por último, en LTE, se utilizan las señales de referencia (RS), que son señales predefinidas que ocupan unos elementos de recurso específicos y son utilizadas por el terminal móvil para la estimación del canal. En este caso no hay que aplicar ninguna corrección ya que los umbrales de LTE mostrados en la tabla están referidos a la potencia total, y no a la que se mide en las RS.

Para realizar el estudio de cada uno de los servicios, hay que combinar las diferentes tecnologías que lo proporcionan. Cada una de estas tecnologías tiene umbrales de recepción diferentes, por lo que para combinarlas en un mismo estudio multicobertura hay que fijar un umbral común (Sirenet requiere un umbral común para el estudio multicobertura). Para ello, se cogió el umbral de UMTS como el de referencia para todos los estudios, ya que UMTS es la única tecnología que se considera para voz y para datos. Para igualar el umbral de GSM y LTE al de UMTS se definieron diferentes antenas de recepción:

- Antena isotrópica de -2 dBi de ganancia para GSM. El umbral de UMTS para voz es de -89 dBm (-99 dBm + 10 dB de corrección debido al CPICH) por lo que fijando un umbral de -89 dBm para voz en GSM, con una antena de recepción de -2 dBi de ganancia, es equivalente a fijar un umbral de -87 dBm, que es el que realmente requiere el servicio de voz en GSM.
- Antena isotrópica de $+6$ dBi de ganancia para LTE. El umbral de UMTS para el servicio de datos es de -84 dBm (-94 dBm + 10 dB de corrección debido al CPICH) por lo

que fijando un umbral de -84 dBm para el servicio de datos en LTE con una antena de recepción de $+6$ dBi de ganancia es equivalente a fijar un umbral de -90 dBm, que es el que realmente requiere el servicio de datos en LTE. De manera análoga sucede con el servicio de banda ancha.

- Antena isotrópica de 0 dBi de ganancia para UMTS.

Tras la aplicación de dichas correcciones los umbrales quedan:

- Cobertura de voz (GSM y UMTS): exterior **-89 dBm**; interior **-74 dBm**.
- Cobertura de datos (UMTS y LTE): exterior **-84 dBm**; interior **-69 dBm**.
- Cobertura de banda ancha (UMTS y LTE): exterior **-75 dBm**; interior **-60 dBm**.

La determinación de las pérdidas de penetración en interiores es una tarea complicada que depende de parámetros de construcción del edificio y generalmente no se dispone de ellos, por lo que se optó por un valor aproximado y común para todo el municipio. Los valores típicos de pérdidas por penetración en interiores rondan los 12-20 dB, por lo que se optó un valor de 15 dB para el estudio.

4.2.2. Correcciones para los servicios de voz/datos/banda ancha con reducción de potencias

Como se ha explicado anteriormente en la introducción, la nueva ordenanza del ayuntamiento obligaría a reducir los niveles de PIRE en aproximadamente 34 dB. Para tener en cuenta dicha reducción de potencia en los estudios, aparte de las correcciones anteriores hay que aplicar una corrección de $+34$ dB. La corrección se aplica sobre los umbrales, en lugar de sobre la potencia de transmisión porque se requeriría un estudio multicobertura adicional, ya que al cambiar los parámetros de transmisión, Sirenet debe realizar los cálculos desde cero. Al aplicarse sobre los umbrales, una vez calculada la simulación se puede cambiar el umbral del área que se representa de forma inmediata sin necesidad de rehacer ningún cálculo. Los umbrales resultantes son:

- Cobertura de voz (GSM y UMTS): exterior **-55 dBm**; interior **-40 dBm**.
- Cobertura de datos (UMTS y LTE): exterior **-50 dBm**; interior **-35 dBm**.
- Cobertura de banda ancha (UMTS y LTE): exterior **-41 dBm**; interior **-26 dBm**.

4.2.3. Correcciones estudio de emisiones (suma de potencias)

En el estudio de emisiones, se va a calcular la suma de potencias resultante del funcionamiento de todos los transmisores que ofrecen servicio en la ciudad. Sin embargo, los cálculos se van a realizar en unidades de intensidad de campo eléctrico, ya que en potencia dependería de la frecuencia, debido a que el factor de conversión campo-potencia varía con la frecuencia.

Para el Real Decreto (normativa existente) el valor depende de la frecuencia. Tomamos el valor de 900 MHz (el más restrictivo): **41.2 V/m**. Para la ordenanza (nueva): **0.61 V/m**.

Hay que aplicar una corrección por número de portadoras, ya que hay que tener en cuenta todas las portadoras que están asignadas a cada base para este estudio. Se ha supuesto un valor medio de dos portadoras para cada base, y cada tecnología.

Al haber el doble de portadoras en cada base, la potencia radiada por ellas es el doble. Este incremento en un factor dos en potencia, es equivalente a un incremento en un factor $\sqrt{2}$ en unidades de intensidad de campo. En lugar de aumentar la potencia transmitida por todos los transmisores, se va a reducir el nivel de umbral, ya que es mucho más cómodo.

Los umbrales para el estudio de emisiones tras aplicar esta corrección son:

- **29.13 V/m** para la normativa existente.
- **0.43 V/m** para la ordenanza nueva.

4.2.4. Correcciones 112

Para este servicio no es necesario realizar ninguna corrección adicional, es equivalente al servicio de voz pero con los transmisores de todos los operadores.

Resumiendo, los valores umbrales finales resultantes después de aplicar todas las correcciones son:

Tabla 3. Umbrales de potencia tras correcciones

Situación	Exterior	Interior
Voz GSM 900 y 1800 MHz	−89 dBm	−74 dBm
Voz GSM 900 y 1800 MHz con potencias reducidas	−55 dBm	−40 dBm
Voz UMTS 900 y 2100 MHz	−89 dBm	−74 dBm
Voz UMTS 900 y 2100 MHz con potencias reducidas	−55 dBm	−40 dBm
Datos UMTS 900 y 2100 MHz	−84 dBm	−69 dBm
Datos UMTS 900 y 2100 MHz con potencias reducidas	−50 dBm	−35 dBm
Banda ancha UMTS 900 y 2100 MHz	−75 dBm	−60 dBm
Banda ancha UMTS 900 y 2100 MHz con potencias reducidas	−41 dBm	−26 dBm
Datos LTE 1800 MHz	−84 dBm	−69 dBm
Datos LTE 1800 MHz con potencias reducidas	−50 dBm	−35 dBm
Banda ancha LTE 1800 MHz	−75 dBm	−60 dBm
Banda ancha LTE 1800 MHz con potencias reducidas	−41 dBm	−26 dBm

4.3. Importación de transmisores en SIRENET

Para poder realizar el estudio, los cuatro operadores de telefonía móvil que dan servicio en la ciudad proporcionaron los datos de cada uno de sus emplazamientos y sus parámetros de configuración radio:

- Coordenadas geográficas de los emplazamientos.
- Valor de la PIRE por portadora (potencia isotrópica radiada equivalente).
- Altura de la antena sobre el suelo o sobre el edificio de referencia.
- Orientación del transmisor en acimut.
- Inclinación del transmisor.
- Diagrama de radiación de las antenas en los planos horizontal y vertical, éste último correspondiente al acimut de máxima radiación.
- Frecuencia.
- Número de portadoras por banda y sector.

En primer lugar, para preparar los estudios multicobertura en los que se van a simular cada uno de los servicios, hay que introducir en SIRENET los datos de los emplazamientos de cada uno de los operadores de telefonía móvil. En media, cada operador cuenta con 450 transmisores a través de los cuales da servicio en la ciudad, sumando entre todos aproximadamente 1800 transmisores.

SIRENET cuenta con un método de importación de transmisores que consiste en una tabla de formato definido como la que se muestra a continuación:

Transmisor	Sist. de coordenadas	Long.	Lat.	Num. Canales	Frecuencia	Polarización
------------	----------------------	-------	------	--------------	------------	--------------

Antena	Ganancia	Pot./PRA	Alt. Antena	Acimut	Inclinación	Diagrama de radiación
--------	----------	----------	-------------	--------	-------------	-----------------------

Este método permite importar de manera muy eficaz los transmisores que se van a utilizar en cada estudio, ya que introducirlos manualmente, uno por uno, sería inviable.

Primero hay que crear los diagramas de radiación de las antenas que se van a utilizar en los emplazamientos, tanto su diagrama horizontal como el vertical. SIRENET permite definir los diagramas de radiación introduciendo el nivel de atenuación correspondiente a cada ángulo del diagrama. Los operadores proporcionaron los diagramas de radiación de las antenas que utilizan: numéricamente (valor de atenuación para cada ángulo) o gráficamente.

Tras crear los diagramas de radiación se procedió a crear las tablas con el formato adecuado para su importación. Se separaron los transmisores en grupos para poder distinguirlos claramente, en función del operador y la tecnología, y así facilitar la creación de los estudios multicobertura.

4.4. Creación de estudios multicobertura

Una vez importados todos los transmisores, se procede a generar los estudios de cobertura individuales. SIRENET tiene una opción que permite crear automáticamente los estudios individuales a partir de los transmisores, los cuales han quedado definidos con los parámetros importados en las tablas. Se definen un método de cálculo (modelo de propagación), área de cálculo y parámetros de recepción comunes a todos los estudios individuales y SIRENET los

crea automáticamente.

Tras la creación de los estudios individuales, se continúa con la creación de los estudios multicobertura. Para ello, dentro de todos los estudios individuales, hay que seleccionar cuáles son los que van a formar parte del estudio en cuestión. También hay que definir una serie de parámetros comunes a todos los transmisores y que son equivalentes a los definidos para los estudios individuales, y son: el método de cálculo, área de cálculo, las capas de cartografía que se van a utilizar y los parámetros comunes de recepción.

El tiempo de simulación depende directamente del área de cálculo sobre el que haya que calcular las pérdidas de propagación. Teniendo en cuenta que hay aproximadamente 1800 transmisores, elegir el área de manera inteligente puede suponer ahorrar muchas horas de simulación. Para los transmisores que se encuentran dentro del núcleo urbano se seleccionó un área de 500 metros de radio, que es más o menos típico en una ciudad; para los que están más en el exterior se seleccionó un área de 4 kilómetros de radio y se comprobó que ninguna zona de cobertura quedó recortada por el área de cálculo.

Debido al hecho de que los parámetros de recepción se fijan de manera común a cada uno de los transmisores que componen el estudio, hay que tomar una serie de precauciones antes de generar el estudio multicobertura donde se va a simular cada servicio.

Cada servicio está compuesto por estaciones base de diferentes tecnologías (GSM/UMTS/LTE) y que trabajan en diferentes bandas (900/1800/2100/2600). Por lo que los parámetros de recepción no pueden ser comunes a todos los transmisores del estudio, ya que cada tecnología tiene una antena isótropa de recepción con ganancia diferente. Asimismo, SIRENET, además de tener en cuenta la frecuencia de transmisión para el cálculo de las pérdidas básicas de propagación (como es natural), también tiene en cuenta la frecuencia de referencia del receptor, por lo que esto es un motivo más por lo que hay que realizar un paso previo a la creación de los estudios multicobertura de cada servicio.

Como ejemplo ilustrativo, se explican a continuación los pasos a seguir para la creación del estudio del servicio de voz y que son análogos al resto de servicios.

1. Identificar qué tecnologías y bandas de frecuencia se utilizan para dar cada servicio.
2. Separar los transmisores por tecnología y por banda de trabajo.
3. Crear estudios multicobertura para cada tecnología y para cada banda.
4. Ahora sí, fijar los parámetros comunes de recepción (frecuencia y antena de recepción).

5. Crear el estudio multicobertura donde se va a simular el servicio, pero ahora se dejan los parámetros de recepción que están por defecto (que corresponden a los fijados en los multicobertura previos). Así se consiguen respetar los parámetros de recepción para cada banda y tecnología.

4.5. Ajuste de coordenadas de transmisores

Una vez creado el estudio multicobertura, y estando colocados todos los emplazamientos en el mapa, se observó que la mayoría de ellos no estaban situados en su emplazamiento real, debido a posibles errores en las coordenadas proporcionadas por los operadores, ya que los transmisores no estaban en la calle correcta, o incluso ni siquiera estaban colocados sobre edificio. Por este motivo, se tuvo que mover uno por uno, cada uno de los transmisores a su emplazamiento correcto (o bien mirando la dirección postal, en el caso de que esta hubiese sido proporcionada, o bien buscando un edificio con la misma cota que la proporcionada en los datos, en los alrededores de donde había sido situado inicialmente).

Comprobar que todos los transmisores están situados correctamente es de vital importancia, ya que la cobertura que proporcionan depende en gran medida de su emplazamiento. Un transmisor que no estuviese colocado sobre edificio podría cubrir un área mínima, obteniéndose así unos resultados muy alejados de la realidad.

Para la corrección de los emplazamientos se utilizaron el mapa de edificios y el mapa de calles. Tres de los operadores no facilitaron la dirección postal del emplazamiento, como sí que facilitaron la altura del edificio sobre el que estaba situado el emplazamiento, el mapa de edificios resultó de gran utilidad para realizar el ajuste.

4.6. Simulación

Tras corregir los emplazamientos de las estaciones base y comprobar que los datos importados de los transmisores son correctos, ya se puede empezar a simular. Para ello simplemente hay que fijar unos umbrales de potencia o de intensidad de campo, asignarle un color a cada umbral y SIRENET empezará a calcular el área que satisface dicho umbral, utilizando el modelo de propagación seleccionado (Okumura-Hata urbano-pequeño). El modelo de propagación requiere conocer datos del terreno circundante al transmisor. Para ello se utilizó el mapa de cotas, que representa la cota resultante de la suma de la cota del terreno y de la

altura del edificio.

Finalmente, para presentar los resultados a los operadores se utilizó el mapa de calles del municipio.

4.7. Estudio de emisiones

Para realizar la simulación del estudio de emisiones, hay que crear un estudio multicobertura con todos los transmisores de los cuatro operadores. Hay que tener en cuenta que para este estudio, el resultado de los cálculos va a presentarse en unidades de intensidad de campo eléctrico y que por lo tanto, el receptor no interviene en la simulación (realmente sí, el modelo de Hata necesita saber su altura). Para calcular la suma de potencia de todos los transmisores, Aptica incluyó especialmente en la versión de SIRENET que se ha utilizado (3.5.0.0) una opción que permite calcular de forma automática la suma cuadrática de los campos producidos por todas las estaciones.

4.8. Mejor servidor

Sirenet permite representar el área de cobertura en el que se recibe la señal de un transmisor con mayor potencia que la procedente del resto de transmisores. Esto se utilizará para el estudio del tráfico cursado por las estaciones base, ya que los terminales que se encuentren en dicho área de cobertura realizando medidas sobre el canal piloto, la portadora baliza o las RS, se conectarían a dicha estación base a la hora de cursar tráfico. En la práctica, la selección de célula también depende de la histéresis y de parámetros enviados por la red.

5. Mapas de resultados de servicios

En esta sección se van a presentar los mapas de resultados de los servicios que ofrece uno de los cuatro operadores que operan en el municipio. Por motivos de confidencialidad no se menciona a qué operador corresponden los emplazamientos. Por la misma razón, los resultados obtenidos no se van a mostrar sobre el mapa del municipio, sino sobre un mapa en blanco en el que se ven las estaciones base y la zona que satisface los umbrales especificados anteriormente en un color, en función de si se trata de cobertura en interiores o en exteriores.

El área representada en los mapas es de 18,000 km x 18,000 km e incluye la totalidad de la superficie urbanizada del municipio. En los mapas de cobertura representados, las zonas coloreadas en rojo corresponden a la cobertura del servicio en el interior de los edificios, mientras que las zonas coloreadas en azul corresponden a la cobertura del servicio en exteriores. En las zonas que quedan en blanco el servicio en cuestión no está disponible.

5.1. Servicio de voz

Para ofrecer el servicio de voz este operador cuenta con emplazamientos de GSM en las bandas de 900 y 1800 MHz y UMTS en las bandas de 900 y 2100 MHz. Los emplazamientos más importantes a la hora de ofrecer servicio de voz son los de la banda de 900 MHz ya que permiten cubrir un área mayor y es un servicio que requiere poca tasa binaria. Es importante recordar también que UMTS permite cubrir mayor área que GSM, que de acuerdo con las hipótesis y datos considerados para nuestro estudio, equivale a 2 dB de pérdida básica como se indicó en el apartado 4.1.

5.1.1. Voz en exteriores

En términos de la cobertura en exteriores, la incidencia de la aplicación de la reducción de potencia supone reducir el área cubierta por este servicio al 2.8% del área actual. Para calcular la reducción de cobertura, se creó un programa en matlab que cuenta sobre un mapa sin fondo y sin estaciones base, el número de pixels coloreados, con y sin reducción de potencia, y obtiene la relación. Los umbrales correspondientes a los mapas actuales y de potencia reducida son **-89 dBm** y **-55 dBm** respectivamente.

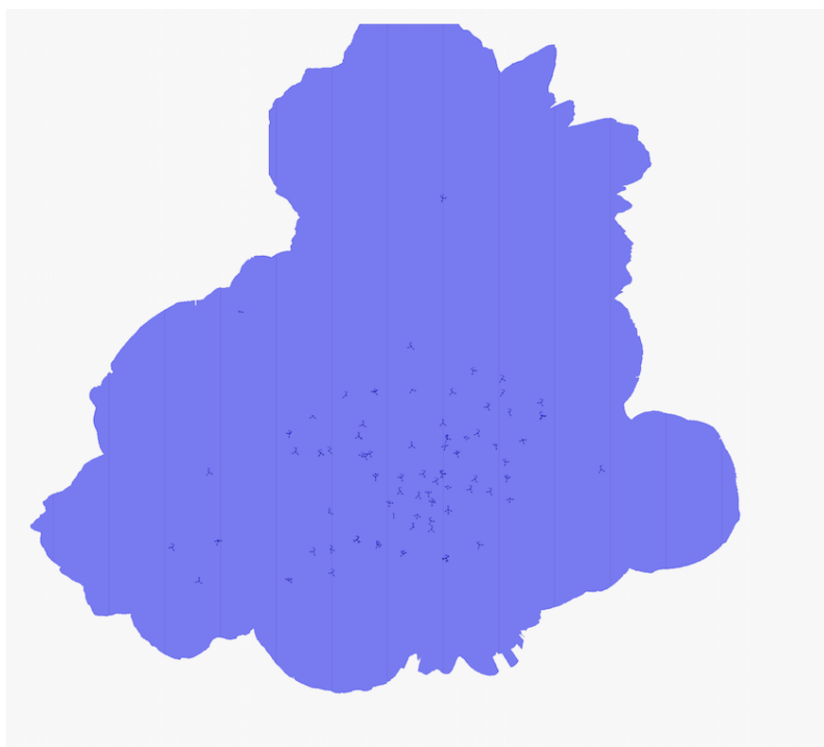


Figura 1: Voz en exteriores actual

El servicio de voz en exteriores es el que requiere un nivel de señal más bajo y por tanto, es el que mayor área de cobertura abarca. Cubre la zona urbanizada del municipio, las carreteras que lo rodean y la zona no urbanizada.



Figura 2: Voz en exteriores con potencia reducida

Como puede observarse, el servicio queda muy reducido, quedando casi la totalidad del municipio sin cubrir. El servicio de voz es el más básico y el que menor potencia requiere y aún así, la cobertura resultante dejaría el servicio inutilizable, siendo únicamente posible cursar llamadas en las proximidades de los emplazamientos y con una movilidad muy reducida. Al reducirse la potencia de las estaciones base, la interferencia generada sobre las estaciones vecinas es menor, por lo que la cobertura en UMTS en enlace descendente sería en la práctica algo mejor que lo representado.

El sistema quedaría, además, totalmente sobredimensionado, ya que cada sector de los emplazamientos de GSM cuenta con dos portadoras (sin tener en cuenta la portadora baliza). Cada portadora de GSM permite cursar hasta ocho llamadas telefónicas de forma simultánea. En cuanto a UMTS, estimar la capacidad de cada portadora es una tarea algo más complicada ya que intervienen en ella diversos factores, difíciles de cuantificar, como son la interferencia generada por las estaciones vecinas o que la capacidad en UMTS se comparte entre servicio de datos y servicio de voz. Como valor orientativo se puede fijar un valor de 50 llamadas

telefónicas por portadora de UMTS.

5.1.2. Voz en interiores

En términos de la cobertura en interiores, la incidencia de la aplicación de la reducción de potencia supone reducir el área cubierta por este servicio al 1 % del área actual.

Como puede observarse a continuación, actualmente el servicio de voz en interiores se ofrece en toda la zona urbanizada del municipio. Tras la aplicación de la correspondiente reducción de potencia este servicio de voz pasa a ser casi inexistente, ofreciéndose sólo en el edificio donde se encuentra la estación base.

Los umbrales correspondientes a los mapas actuales y de potencia reducida son **−75 dBm** y **−41 dBm** respectivamente.

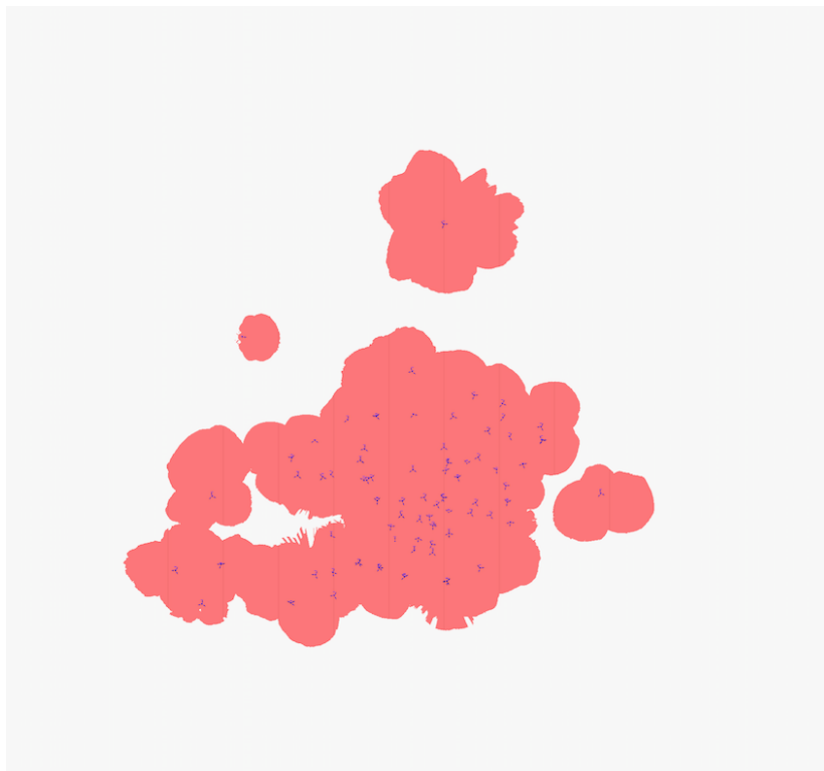


Figura 3: Voz en interiores actual

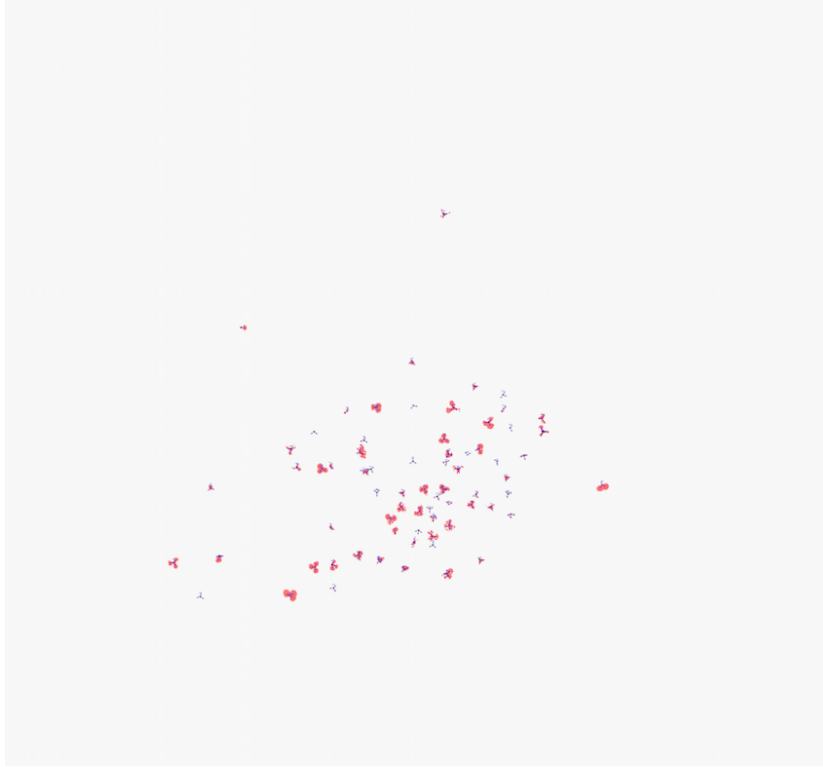


Figura 4: Voz en interiores con potencia reducida

5.2. Servicio de datos

Para ofrecer el servicio de datos este operador cuenta con emplazamientos de UMTS en las bandas de 900 y 2100 MHz, y LTE en las bandas de 1800 MHz y 2600 MHz con anchos de banda de 10 y 20 MHz respectivamente. Se trata de un servicio básico de datos hasta velocidades de 0.5 Mbit/s.

5.2.1. Datos en exteriores

Los umbrales correspondientes a los mapas de datos en exteriores actuales y de potencia reducida son **-84 dBm** y **-50 dBm**. Cabe recordar también que para la misma tasa binaria, LTE requiere una potencia necesaria de recepción 6 dB menor que en UMTS, lo que podría derivar en una mejor cobertura por parte de LTE.

La reducción de potencia, al igual que en los servicios mostrados anteriormente, provocaría

que el servicio desapareciera casi en su totalidad, estando disponible únicamente en las proximidades de la estación base, inviable para un servicio de comunicaciones móviles. El área cubierta pasaría a ser el 1 % de la que se cubre actualmente, aunque como se ha comentado en el servicio voz, la cobertura real podría ser ligeramente mayor debido a la mejora que se experimenta en la SINR provocada por la menor interferencia generada por las estaciones vecinas.

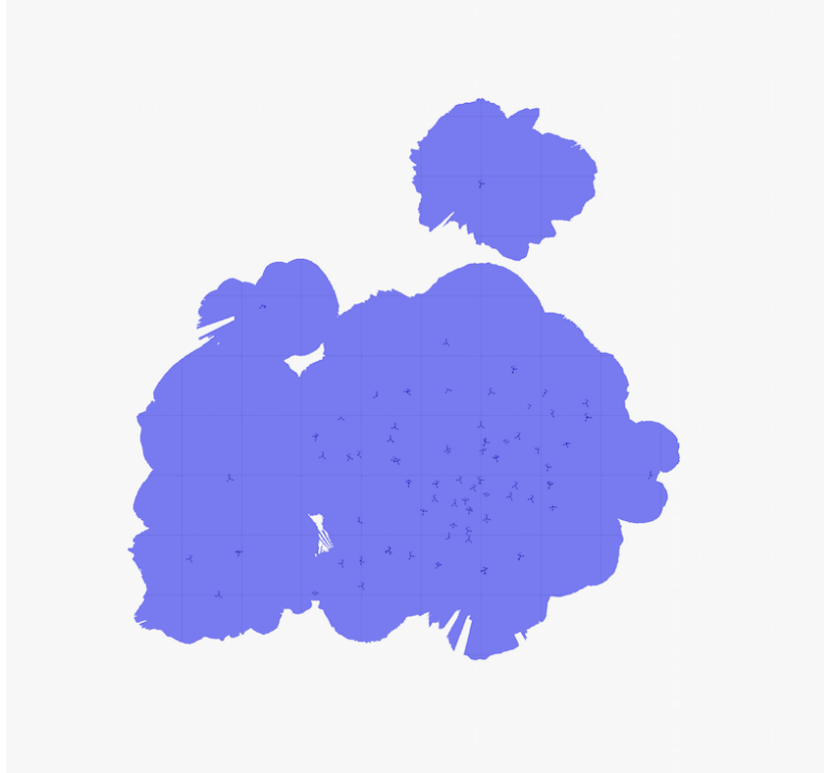


Figura 5: Datos en exteriores actual



Figura 6: Datos en exteriores con potencia reducida

5.2.2. Datos en interiores

En términos de la cobertura en interiores, la incidencia de la aplicación de la reducción de potencia supone reducir el área cubierta por este servicio al 1 % del área actual. Los umbrales correspondientes a los mapas actuales y de potencia reducida son **−69 dBm** y **−35 dBm** respectivamente.

Los servicios de datos en interiores presentan mayores dificultades, siendo difícil alcanzar la tasa binaria máxima para la que ha sido diseñado el sistema. A pesar de ello puede observarse

a continuación, que actualmente el servicio de datos en interiores se ofrece prácticamente en toda la zona urbanizada del municipio, no obstante, tras la aplicación de la correspondiente reducción de potencia este servicio de datos pasa a ser completamente inexistente.

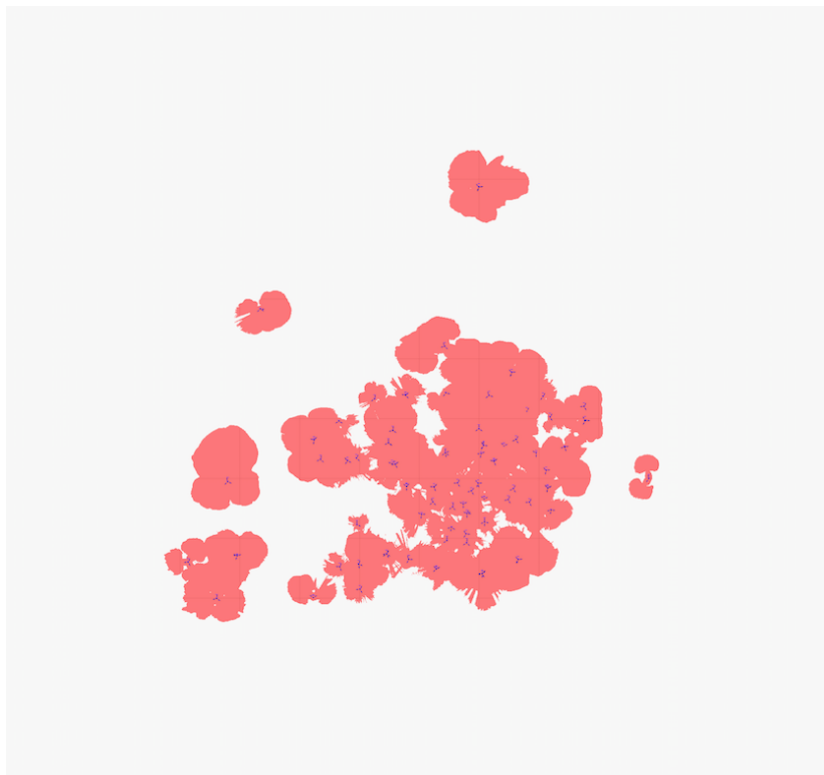


Figura 7: Datos en interiores actual



Figura 8: Datos en interiores con potencia reducida

5.3. Servicio de banda ancha

Para ofrecer el servicio de banda ancha este operador cuenta con emplazamientos de UMTS en las bandas de 900 MHz y 2100 MHz, y LTE en las bandas de 1800 MHz y 2600 MHz con anchos de banda de 10 MHz y 20 MHz respectivamente. Se trata de un servicio de datos con velocidades ≥ 10 Mbps.

5.3.1. Banda ancha en exteriores

Los umbrales correspondientes a los mapas de banda ancha en exteriores actuales y de potencia reducida son **-75 dBm** y **-41 dBm**. De la misma forma que para el servicio de datos básico, LTE requiere 6 dB menos de potencia mínima de recepción que podría derivar en una mejor cobertura por parte de esta tecnología con respecto a UMTS.

El servicio de banda ancha móvil es el que mayor nivel de señal necesita, y por tanto, es el más complicado de ofrecer en la totalidad del municipio, sin embargo, la cobertura en exteriores es muy buena y cubre gran parte de este. La reducción de potencia, al igual que en los servicios mostrados anteriormente, provocaría que el servicio no pueda ser ofrecido, ya que el área cubierta pasaría a ser el 1 % de la que se cubre actualmente.

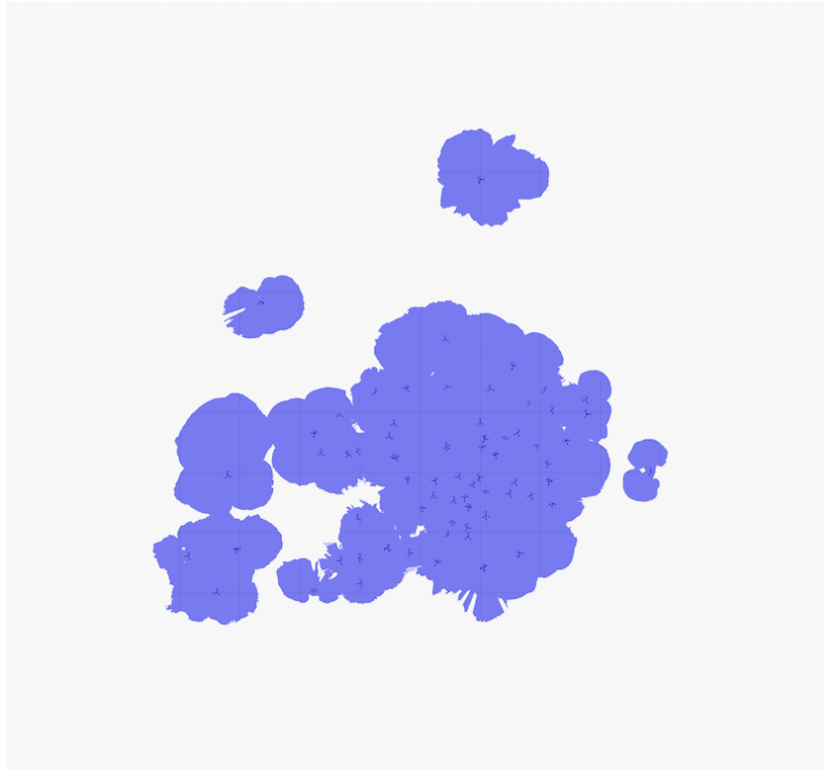


Figura 9: Banda ancha en exteriores actual

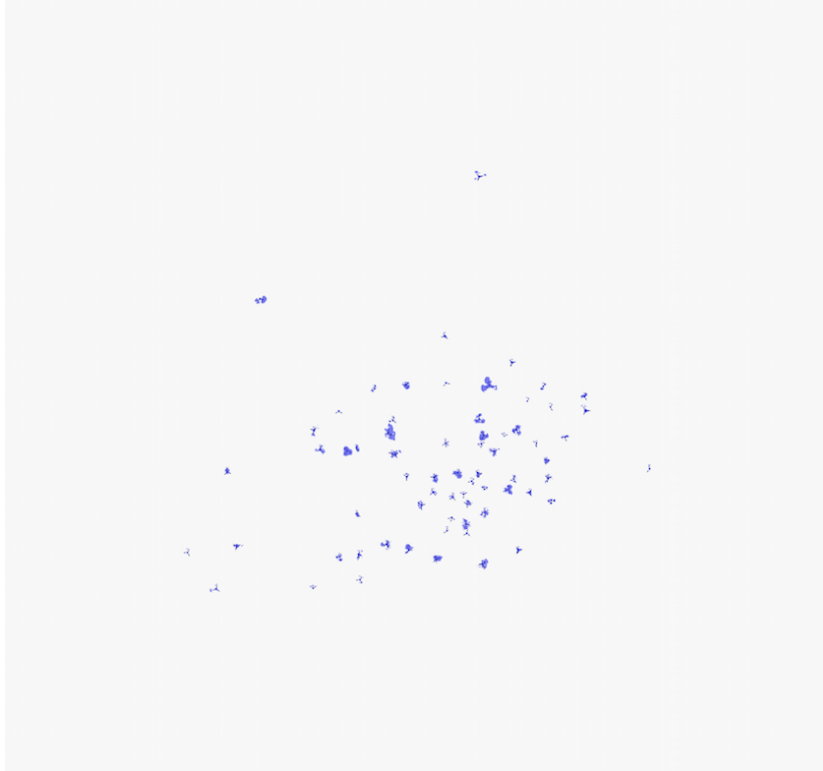


Figura 10: Banda ancha en exteriores con potencia reducida

5.3.2. Banda ancha en interiores

Debido a las altas exigencias técnicas que requiere el servicio de banda ancha móvil, la cobertura en interiores es bastante limitada. No obstante, esto no significa que no se pueda ofrecer servicio de datos en las zonas en blanco con una tasa mayor de $\geq 0,5$ Mbps correspondientes al servicio de datos básico, sino que no se pueden alcanzar las condiciones de recepción necesarias para ofrecer 10 Mbps. Técnicas como la adaptación de tasa binaria en sistemas de evolución 3G o la utilización de OVSF (Orthogonal variable spreading factor) de mayor factor de ensanchamiento en UMTS, permiten reducir la tasa binaria por debajo de 10 Mbps para mantener la calidad necesaria.

En términos de la cobertura en interiores, la incidencia de la aplicación de la reducción de potencia supone reducir el área cubierta por este servicio al 1 % del área actual. Los umbrales correspondientes a los mapas actuales y de potencia reducida son **−60 dBm** y **−26 dBm** respectivamente.

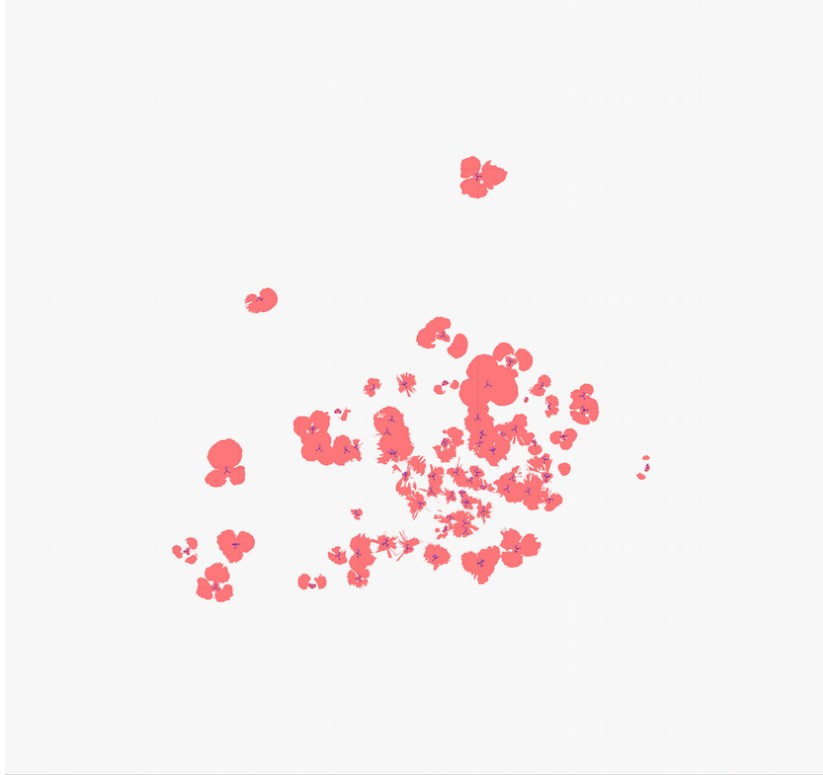


Figura 11: Banda ancha en interiores actual



Figura 12: Banda ancha en interiores con potencia reducida

5.4. Servicio 112

Es el servicio de emergencias. Es equivalente al servicio de voz pero con la salvedad que engloba a los cuatro operadores, es decir, para este estudio se han empleado las estaciones base de GSM 900/1800 y UMTS 900/2100 de los cuatro operadores de telefonía móvil. Es el servicio que mayor área de cobertura cubre ya que cuenta con un mayor número de emplazamientos.

5.4.1. Servicio 112 en exteriores

Los umbrales del 112 son los mismos que para el servicio de voz: **−89 dBm** que corresponden al servicio actual y **−55 dBm** que corresponden al de potencia reducida.

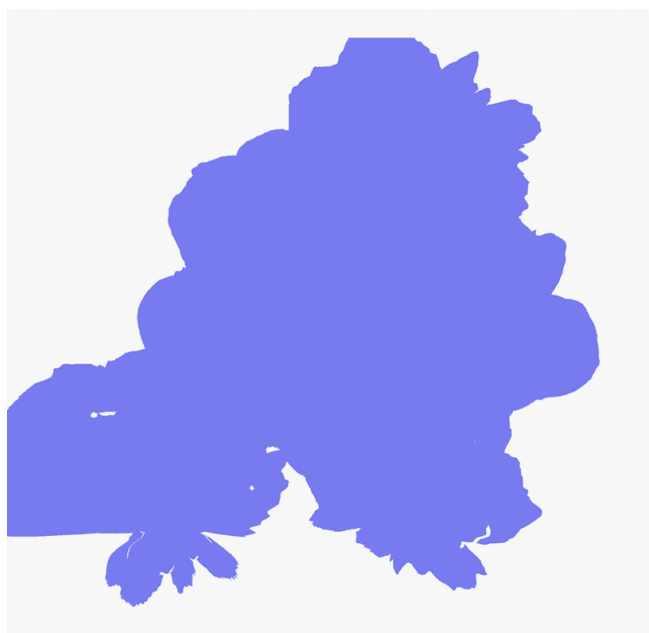


Figura 13: 112 en exteriores actual

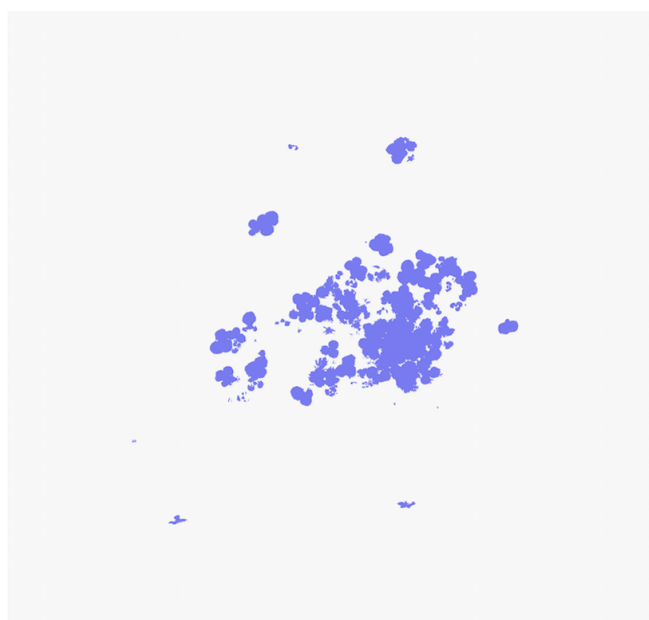


Figura 14: 112 en exteriores con potencia reducida

La reducción de potencia supone reducir el área de cobertura al 7.8 % del valor actual. En este caso la diferencia es mucho menor que en los servicios anteriores debido a la gran cantidad de emplazamientos que hay en la ciudad (contando los cuatro operadores). Todos los operadores pretenden cubrir la misma zona de cobertura, por tanto, el grado de solapamiento es muy alto.

5.4.2. Servicio 112 en interiores

Los Umbrales para exteriores son iguales que en el servicio de voz: **-74 dBm** que corresponden al servicio actual y **-40 dBm** que corresponden al de potencia reducida.



Figura 15: 112 en interiores actual



Figura 16: 112 en interiores con potencia reducida

Para el servicio en interiores el área de cobertura pasa a ser el 3,3% del valor actual.

5.5. Estudio de emisiones

En los mapas de resultados anteriores, hemos podido observar la grave pérdida de cobertura que se sufre en todos los servicios tras la reducción de la potencia transmitida en 34 dB, hasta el punto que alguno de los servicios desaparece casi completamente.

En este estudio vamos a comparar las zonas en las que se superan los umbrales de máxima exposición:

1. El que fija el Real Decreto que es el que está vigente en la actualidad: **41.2 V/m** representado en naranja.
2. El que fija la nueva Ordenanza Municipal: **0.61 V/m**, representado en verde



Figura 17: Estudio de emisiones

Como puede observarse, en muy pocas zonas se supera el umbral de 0.61 V/m a pesar de ser este muy restrictivo (se reduce la potencia transmitida en más de un factor 2000). Los lugares donde se supera el umbral corresponden a las zonas donde se encuentran los emplazamientos. La imagen de la página siguiente permite ver con mayor detalle una zona del casco urbano.

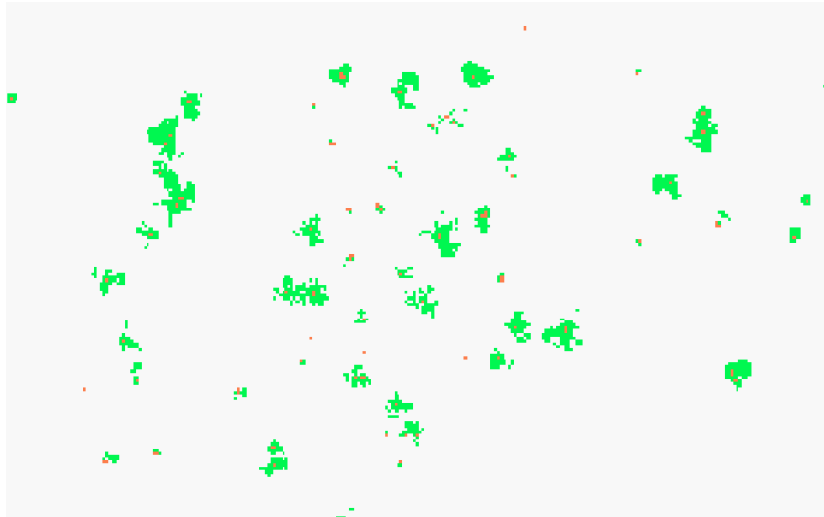


Figura 18: Estudio de emisiones

En esta imagen se puede apreciar también el color naranja correspondiente al umbral actual de 41.2 V/m donde puede observarse que sólo se supera a pie de antena. El área representada en este mapa es 4.5 km x 4.5 km.

Tras comparar los diferentes mapas de resultados se pueden sacar las primeras conclusiones:

1. La normativa no tiene en cuenta las características técnicas de los servicios de telefonía móvil.
2. Los servicios de telefonía móvil desaparecen. Sólo podría ofrecerse el servicio de voz en exteriores y aumentando en gran medida la cantidad de estaciones base.
3. El valor umbral de exposición actual sólo se supera a pie de antena, por lo que el servicio actual no supone un riesgo para la población.
4. Podría fijarse un umbral intermedio entre el actual y el nuevo que permitiese mantener el servicio de telefonía móvil, a costa de aumentar el número de emplazamientos.
5. Actualmente, no hay indicios de que los estudios epidemiológicos aconsejen una reducción de los niveles de exposición radioeléctrica con respecto a los niveles aceptados mundialmente, por lo que los niveles actuales de radiación no suponen un riesgo para la salud.

6. Estudio aproximado del tráfico cursado por las estaciones base

A la hora de realizar una planificación radio, además de realizar un balance de enlace donde se define el área de cobertura en términos de pérdida básica de propagación, también hay que realizar un estudio del tráfico que tendrá que soportar una estación base dentro de su área de cobertura. De esta manera, se puede determinar si el sistema está sobredimensionado o se queda corto, es decir, tiene muchos o pocos recursos asignados respectivamente para una calidad de servicio dada. En este segundo caso tendríamos que asignarle mayor cantidad de recursos, o reducir la cobertura e incrementar la cantidad de emplazamientos para mantener la calidad de servicio.

Para realizar este estudio se utilizarán los resultados de las simulaciones obtenidas del estudio de mejor servidor. En este estudio se representa para cada sector de las estaciones base, el área de cobertura en la cual, los terminales que se encuentren en dicho área seleccionarían dicha célula para cursar tráfico, ya que es la que se recibe con mayor nivel (en la práctica, esta decisión también depende de la histéresis o de parámetros enviados por la red para dar más peso a unas células y a unos sistemas determinados: UTRAN/E-UTRAN). Para poder obtener el área que cubre cada sector, hay que crear una capa administrativa en SIRENET. En primer lugar hay que crear una capa de polígonos, y definir un polígono que abarque el área total de cobertura del servicio de voz, a continuación, se genera la capa administrativa a partir de la capa de polígonos, y finalmente, hay que consultar los datos de la capa administrativa relativos a mejor servidor. A la capa administrativa también se le puede añadir una capa demográfica con los datos demográficos del municipio, y así obtener directamente los datos del estudio de tráfico, pero no contábamos con ella. Los cálculos se realizarán por tanto a mano. Se han utilizado diferentes valores de densidad de población en función de la zona donde se encuentra cada estación base con el fin de obtener unos resultados lo más realistas posible.

Como el sistema GSM utiliza una red de circuitos conmutados para el servicio de voz y el número de canales físicos existentes es fijo, se utilizará la fórmula de Erlang B para el cálculo de la probabilidad de bloqueo. Para UMTS también se utilizará la fórmula de Erlang B, a pesar de que no sea correcto, ya que la cantidad de recursos que se tienen en UMTS para el servicio de voz varía con el tiempo. Esto es debido a que UMTS es un sistema que utiliza una forma de acceso múltiple no ortogonal y su capacidad viene limitada por la interferencia, la cual también varía en función de la carga de las células o sectores vecinos, además, la limitación por interferencia no es fija, ya que se puede aceptar una conexión adicional a costa de degradar ligeramente las conexiones existentes. No obstante, es la única fórmula

que proporciona una aproximación válida.

6.1. Fórmula de Erlang B

Permite calcular la probabilidad de bloqueo en una red de circuitos conmutados. La fórmula de Erlang B se aplica bajo la condición de que al recibirse una solicitud de llamada cuando la red está al máximo de su capacidad, dicha llamada se pierde, no se pone en cola.

6.1.1. Tráfico ofrecido

- A : es la intensidad de tráfico, es decir, el número medio de canales ocupados. Se supone que todas las llegadas son aceptadas. $A = \frac{\lambda}{\mu} = M \cdot a = S \cdot \rho$.
- λ : tasa de llegadas a la célula/sector.
- μ : tasa de servicio en la célula/sector.
- M : número de usuarios en la célula/sector.
- a : tráfico ofrecido por usuario. $a = \frac{\text{Duración media de la llamada}}{\text{Tiempo entre llamadas}}$
- S : superficie de la célula/sector.
- ρ : densidad de tráfico (a·densidad de usuarios).

6.1.2. Tráfico cursado

- A_c : número medio de canales ocupados en la célula/sector. $A_c = A \cdot (1 - P_B)$.
- P_B : probabilidad de bloqueo. $P_B = \frac{A^{N_c}/N_c!}{\sum_{k=0}^{N_c} A^k/k!} = B(A, N_c)$, donde N_c es la cantidad de recursos FDM/TDM en la célula/sector.

La llegada de llamadas sigue una distribución de Poisson, mientras que el tiempo entre llamadas sigue una distribución exponencial. La duración de las llamadas sigue una distribución exponencial y se supondrá una duración media de 100 segundos.

El dimensionado de canales de voz en GSM se realiza teniendo en cuenta una probabilidad de bloqueo de aproximadamente un 1 %, donde se tienen en cuenta tanto la probabilidad de bloqueo por falta de canales de tráfico como de señalización. Para hacer los cálculos, no se van a considerar los posibles traspasos que pueda haber entre las diferentes células o sectores. Se va a considerar que el tráfico por usuario es de 25 miliErlangs.

Todos los emplazamientos de GSM cuentan con tres portadoras, sin embargo, una de ellas es la portadora baliza que utiliza dos canales físicos para el envío de señalización y seis para cursar tráfico, por lo que en cada sector disponemos de dos radiocanales que cuentan a su vez con ocho canales físicos más los seis canales físicos de la portadora baliza, por tanto, tenemos que en GSM N_c es igual a 22.

El dimensionado en UMTS seguirá los mismos criterios que en GSM, no obstante, el cálculo de la cantidad de recursos resulta más complicado que en GSM, debido a que UMTS es un sistema limitado por interferencia y esta varía a lo largo del tiempo, y a que los recursos también se comparten con el servicio de datos.

6.1.3. Capacidad en sistemas CDMA

A pesar de la dificultad que supone el cálculo de la capacidad en UMTS se puede realizar un cálculo aproximado basándonos en las siguientes hipótesis:

- Se considera únicamente enlace ascendente.
- Se supone una carga por usuario uniforme.
- Se considera una sola clase de servicio.
- Control de potencia ideal sin limitación en la potencia transmitida (pudiendo ser esta infinita).
- Se ignoran la variabilidad de carga y de propagación.

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W}{R} \frac{S}{I+N} = \frac{W}{R} \frac{S}{S(K-1)\rho\alpha+N_0W} \approx \frac{W}{R} \frac{S}{SK\rho\alpha+N_0W} = \frac{W}{R} \frac{1}{K\rho\alpha+N_0W/S}$$

donde :

- W: ancho de banda.
- R: tasa binaria.
- S: potencia en recepción.
- K: número de usuarios por célula o sector.
- ρ : eficiencia de reutilización = (interf. externa)/(interf. interna) + 1
- α : factor de actividad, porcentaje de tiempo en el que el móvil está transmitiendo.

despejando S de la fórmula anterior se tiene:

$$S = \frac{N_0 W}{\frac{W/R}{E_B/N_0} - K \rho \alpha}$$

cuando $S \gg N_0 W$: $K = K_{max}$

$$K_{max} = \frac{W/R}{E_B/N_0 \cdot \rho \alpha}$$

S puede definirse también de la siguiente manera:

$$S = \frac{E_B/N_0}{W/R} \frac{N_0 W}{1 - K/K_{max}} = \frac{E_B/N_0}{W/R} N_0 W \eta$$

Se define el incremento de ruido como: $\eta = \frac{1}{1 - K/K_{max}} = \frac{\text{ruido} + \text{interferencia}}{\text{ruido}}$

Se define el factor de carga como: $X = K/K_{max} = \frac{\text{interferencia}}{\text{ruido} + \text{interferencia}}$

El incremento de ruido refleja la degradación de la sensibilidad del receptor cuando hay K usuarios con respecto a un sistema con un único usuario. Cuando el factor de carga tiende a 1 se obtiene la máxima capacidad del sistema.

Para el servicio de voz en UMTS tenemos que :

- $W = 3.84 \text{ MHz}$
- $R = 12.2 \text{ kbps}$
- E_B/N_0 necesaria: 5,6 dB
- Factor de actividad $\alpha = 0.5$
- Eficiencia de reutilización $\rho = 1,6$

Se ha tomado un valor de E_B/N_0 de 5,6 dB ya que es un valor típico en UMTS. Es un valor variable, que depende del tipo de entorno y de la velocidad del terminal y es necesario recurrir a simulación para su obtención.

Se obtiene de esta forma un número máximo de usuarios (suponiendo potencia de transmisión infinita) de 113. Generalmente, la interferencia máxima que se puede asumir en enlace ascendente se corresponde con un factor de carga del 50 %, por lo que tendríamos capacidad para 56 usuarios.

6.1.4. Resultados de la simulación

En este apartado se van a mostrar el mapa de mejor servidor, el área que cubre cada uno de los sectores de las estaciones base, así como la probabilidad de bloqueo resultante del tráfico cursado por los usuarios de cada sector para la cantidad de recursos asignados a cada uno de ellos.

Para obtener el tráfico cursado se va a calcular el número de habitantes en cada uno de los sectores a partir del área y de la densidad de población. Como hay cuatro operadores dando servicio en la ciudad, se va a suponer que el 25 % de los habitantes que se encuentren en el sector pertenecen al operador en cuestión.

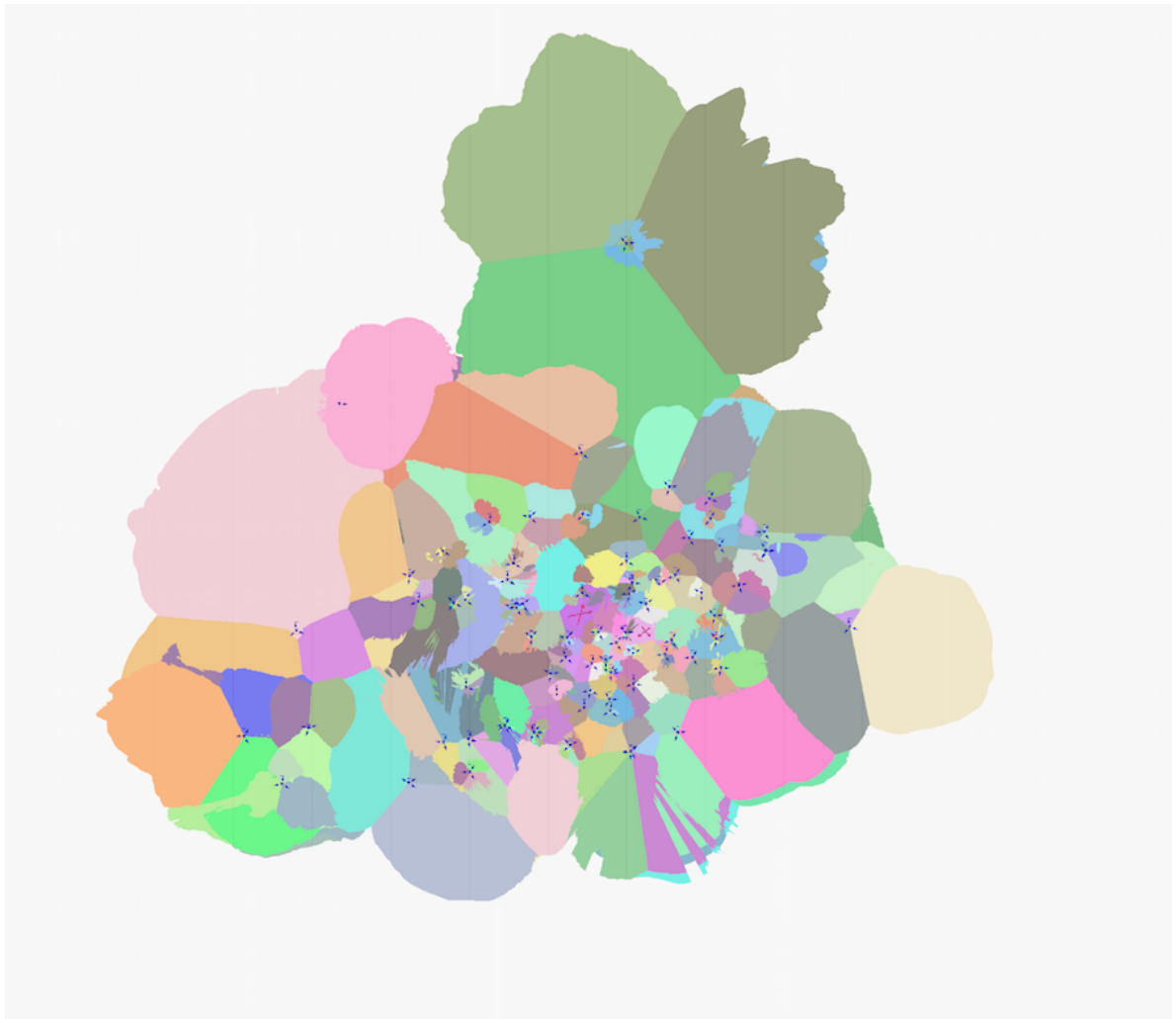


Figura 19: Mejor servidor

A modo de ejemplo se van a mostrar los resultados obtenidos para los sectores marcados con cruces en el mapa:

sector derecho:

- Superficie: 0.0884 km²
- Densidad de población: 22.900 hab/km²
- Población: 2024
- Número de usuarios: 506

- Intensidad de tráfico por usuario: 25 miliErlangs
- Intensidad de tráfico en el sector: 12.65 Erlangs
- Número de canales GSM: 22
- Número de canales UMTS: 56

Aplicando la fórmula de Erlang B se tendría una probabilidad de bloqueo del 0.5 % para GSM y de 0.00 % para UMTS, por lo que cumple con mucho margen la calidad de servicio requerida. En la práctica estos resultados podrían variar debido a las diferentes aproximaciones que se han empleado.

sector izquierdo:

- Superficie: 0,2972 km²
- Densidad de población: 12.000 hab/km²
- Población: 3.566
- Número de usuarios: 891
- Intensidad de tráfico por usuario: 25 miliErlangs
- Intesidad de tráfico en el sector: 22.29 Erlangs
- Número de canales GSM: 22
- Número de canales UMTS: 56

Por lo que aplicando la fórmula de Erlang B se tendría una probabilidad de bloqueo del 15,9 % para GSM y de 0,00 % para UMTS. En este caso la cantidad de recursos asignados a la célula es insuficiente, por lo que la solución más viable sería añadir otra portadora GSM al sector. Se tendrían así 30 canales, y la probabilidad de bloqueo se reduciría a un 2,29 %, no obstante, hay que tener en cuenta que los usuarios están repartidos entre UMTS y GSM, por lo tanto, ninguno de los sistemas tendría que soportar los 22.29 Erlangs de forma individual. Si suponemos que los usuarios están uniformemente repartidos entre las dos tecnologías, el tráfico que tendrían que soportar sería de 11.15 Erlangs, lo que resultaría en una probabilidad de bloqueo de: 0,00 % para UMTS y de 0,14 % para GSM.

Tras aplicar la reducción de potencia derivada de la nueva normativa, la superficie de cobertura de los sectores se reduce a: 0,0069 km² para el sector derecho y 0,02322 km² para el sector izquierdo, quedando los siguientes resultados:

- Sector izquierdo: Usuarios: 69; Intensidad de tráfico en el sector: 1,725 Erlangs; Probabilidad de bloqueo: 0.00 % tanto para GSM como para UMTS.
- Sector derecho: Usuarios: 39; Intensidad de tráfico en el sector 0,975 Erlangs; Probabilidad de bloqueo: 0.00 % tanto para GSM como para UMTS.

Como cabía esperar de los resultados mostrados en los mapas de resultados, el sistema queda totalmente sobredimensionado tras la aplicación de la reducción de potencia.

7. Conclusiones

Este trabajo ha tenido como objetivo la realización de un estudio cuantitativo en el cual se muestran las consecuencias que tendría la reducción de la potencia de transmisión de las estaciones base, debido a la aplicación de la nueva Ordenanza Municipal. Dicho estudio ha sido utilizado por los operadores de telefonía móvil que operan en la ciudad para presentar una reclamación ante la Secretaría del Consejo para la Unidad de Mercado, debido al impacto que supondría la aplicación de la nueva Ordenanza en los sistemas de comunicaciones móviles del municipio.

Tras la realización del estudio se pudieron sacar una serie de conclusiones claras:

En el valor fijado en la Ordenanza Municipal no se han tenido en cuenta las características técnicas de los servicios de telefonía móvil, ya que como ha podido observarse, estos servicios desaparecen casi completamente, no pudiéndose ofrecer siquiera el servicio de emergencias 112. La inversión realizada por los operadores en el despliegue de la red habría sido en vano, y los más perjudicados serían los usuarios, que perderían el acceso a estos servicios que hoy en día se consideran básicos y de uso diario.

En el estudio de emisiones ha podido observarse que el nivel actual de radiación, sólo supera el nivel máximo de exposición fijado por el Real Decreto a pie de antena, zonas donde la población no tiene acceso, por lo que no tienen riesgo de sufrir una exposición prolongada a dichos niveles de radiación. El valor fijado por el Real Decreto, es el mismo que siguen la mayoría de los países miembros de la Unión Europea y no se considera que suponga un riesgo para la salud de la población.

En el estudio también puede observarse que el nivel máximo de exposición que fija la nueva Ordenanza Municipal sólo se supera en la zonas más próximas a los emplazamientos, a pesar

de la severidad de la normativa, siendo el tamaño de esta zona del orden de unos pocos metros, que corresponderían a las azoteas donde se encuentran las estaciones base, lugares donde la población no tiene acceso.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta, que el nivel de exposición que sufre una persona cuando utiliza su teléfono móvil es mucho mayor que el que recibe desde una estación base. La potencia máxima de transmisión de los terminales móviles alcanza los 1–2 vatios (dependiendo de la tecnología), valores del orden de 100 dB mayores que el nivel de recepción que se tiene en el terminal procedente de la estación base, aunque es cierto, que no se trata de una exposición prolongada ni continua (ya que el móvil no está transmitiendo siempre) y que raramente se alcanzan esas potencias de transmisión. No obstante, la gente también está expuesta a las radiaciones de los puntos de acceso Wi-Fi de sus hogares, que pueden estar a escasos centímetros de los usuarios, los cuales alcanzan una potencia de transmisión del orden de 0.1–0.5 vatios y esta sí que se trata de una exposición continua y prolongada, y estos valores siguen considerándose internacionalmente seguros para la población.

No sería posible ofrecer los servicios de telefonía móvil manteniendo la limitación de la nueva Ordenanza, ya que la cobertura quedaría tan gravemente reducida que no podría compensarse aumentando el número de emplazamientos. En algunos países utilizan unos valores máximos de exposición intermedios entre los fijados por la nueva Ordenanza y los fijados por el Real Decreto, que permiten mantener el servicio a costa de aumentar el número de emplazamientos, aunque actualmente, no hay indicios de que los estudios epidemiológicos aconsejen una reducción de los niveles de exposición electromagnética.

8. Referencias

- Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld, “4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband”, second edition, Elsevier, 2013.
- Jose M^a Hernando, Luis Mendo Tomás, José Manuel Riera Salís, Transmisión por Radio, séptima edición, Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid, 2013.
- Mogensen, Preben, “LTE Capacity Compared to the Shannon Bound”, IEEE 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference .
- José María Hernando, Comunicaciones Móviles, segunda edición, Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid, 2004.
- Ley 9/2014 de 9 de mayo, General de Telecomunicaciones (LGT), publicada en el BOE de 10 de mayo de 2014.
- Real Decreto 1066/2001 de 28 de septiembre (B.O.E. de 29 de septiembre de 2001) por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas.
- Orden Ministerial CTE/23/2002, de 11 de enero (B.O.E. de 12 de enero de 2002), por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones.